

Primljen / Received: 8.4.2017.

Ispravljen / Corrected: 26.8.2017.

Prihvaćen / Accepted: 6.11.2017.

Dostupno online / Available online: 10.3.2018.

Analiza mjernih podataka sustava "V/TI Monitor" baziranog na međudjelovanju vozila i kolosijeka

Autori:

**Predrag Tešić**, dipl.ing.građ.

"Tangram projekt" d.o.o. Novi Sad
tesic1989@gmail.com

Doc.dr.sc. **Stanislav Jovanović**, dipl.ing.građ.

Sveučilište u Novom Sadu
Fakultet Tehničkih Nauka
stasha.jovanovic@gmail.com

**Matthew Dick**, dipl.ing.stroj.

Ensco Inc., USA
dick.matthew@ensco.com

Stručni rad

Predrag Tešić, Stanislav Jovanović, Matthew Dick

Analiza mjernih podataka sustava "V/TI Monitor" baziranog na međudjelovanju vozila i kolosijeka

V/TI Monitor (Vehicle/Track Interaction Monitor) jedan je od najnovijih sustava za mjerenje kvalitete elemenata željezničke infrastrukture, koji uz pomoć akcelerometara mjeri i opisuje dinamičko ponašanje vozila u interakciji s kolosijekom. Razvijen je softver VTI-TQI pomoću kojeg je otkriven i protumačen velik broj karakterističnih situacija na prugama, s istodobnom pojavom različitih nepravilnosti i uspostavljena mogućnost predviđanja njihovog rasta u budućnosti generiranjem odgovarajućih trendova propadanja.

Ključne riječi:

željeznička infrastruktura, međudjelovanje vozila i kolosijeka, segmentacija, V/TI Monitor

Professional paper

Predrag Tešić, Stanislav Jovanović, Matthew Dick

Analysis of vehicle/track interaction measurement data using the V/TI Monitor system

The Vehicle / Track Interaction Monitor (V/TI Monitor) is one of the latest-generation systems for measuring quality of railway infrastructure elements which, with the help of accelerometers, measures and describes dynamic behavior of vehicles in interaction with the track. The VTI-TQI software was developed as a means to discover and interpret a considerable number of typical situations on railways involving simultaneous occurrence of various irregularities. The possibility for forecasting future development and growth of such irregularities was established through generation of appropriate deterioration trends.

Key words:

railway infrastructure, vehicle/track interaction, condition monitoring, segmentation, V/TI Monitor

Fachbericht

Predrag Tešić, Stanislav Jovanović, Matthew Dick

Analyse der Messdaten des System "V/TI Monitor" basierend auf der Interaktion von Fahrzeugen und Gleisen

Vehicle/Track Interaction Monitor (V/TI Monitor) ist eines der neuesten Systeme für die Messung der Qualität der Elemente der Eisenbahninfrastruktur, das mithilfe eines Beschleunigungsmessers das dynamische Verhalten der Fahrzeuge in Interaktion mit den Gleisen misst und beschreibt. Entwickelt wurde die Software VTI-TQI, mit deren Hilfe eine große Anzahl an charakteristischen Situationen auf dem Schienenweg entdeckt und gedeutet wurde, mit gleichzeitigem Auftreten unterschiedlicher Unregelmäßigkeiten, und mit der Möglichkeit deren Wachstum in Zukunft durch Generierung entsprechender Trends des Verfalls vorherzusagen.

Schlüsselwörter:

Eisenbahninfrastruktur, Interaktion Fahrzeug – Gleis, Zustandsüberwachung, Segmentierung, V/TI Monitor

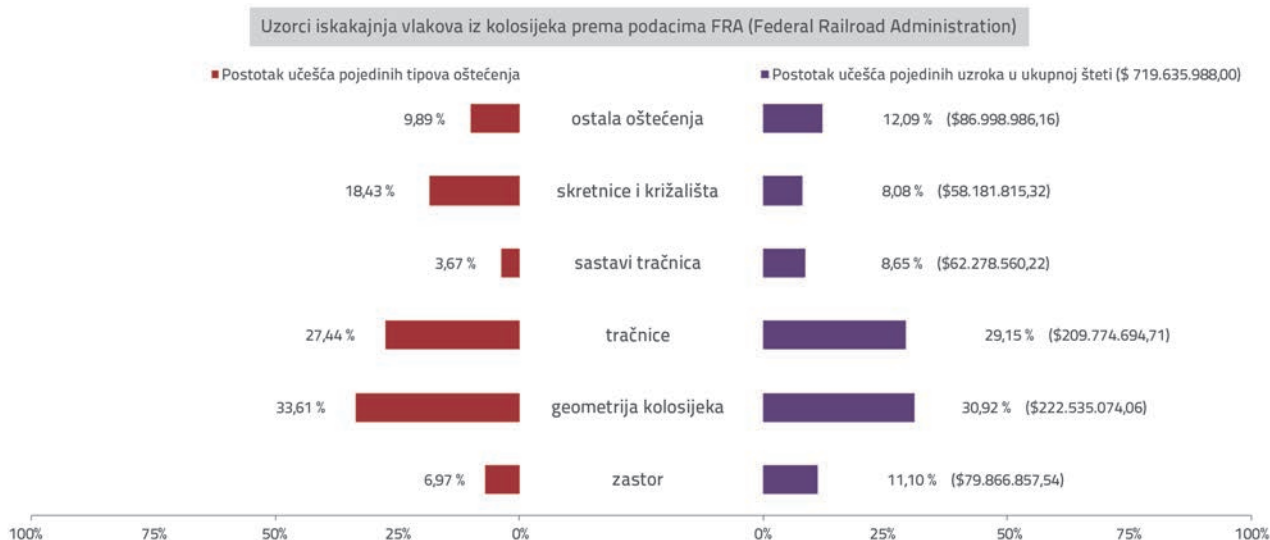
1. Uvod

Napretkom tehnologije, promjenom okruženja i povećanjem zahtjeva od strane korisnika, željeznički sustavi moraju neprekidno unaprjeđivati svoje različite operativne aktivnosti. Osnovni uvjet koji se postavlja jest omogućiti sigurnu i pouzdanu mrežu željezničkih pruga odgovarajućeg kapaciteta i dostupnosti. Međutim, ispuniti taj uvjet postaje svakim danom sve teže, zbog stalnog povećanja brzina kretanja, osovinskih opterećenja i opsega prometa, pri čemu ovo zadnje još dodatno smanjuje raspoloživost infrastrukture za mjerenje i praćenje njenog stanja, kao i održavanje i remont. Jasno je da jednom izgrađena pruga ne može više zbog uporabe dostići svoje početno stanje. Stoga, učinak same željezničke infrastrukture u mnogome će zavisiti od odluka koje će se donositi u vezi s održavanjem i remontom. Jedini efikasan način koji osigurava adekvatno stanje željezničke infrastrukture jest primjena tzv. condition-based pristupa (koji se zasniva na mjerenju i analizi stanja) pri planiranju radova na održavanju i remontu [2-4]. Aktivnosti održavanja i remonta će se provoditi isključivo u skladu s potrebama naznačenima ishodom praćenja stanja sustava (eng. *condition-monitoring*). Istovremeno, "misija" je pristupa *condition-based* učiniti pomak i promjenu sa sadašnjeg pristupa upravljanju radovima na održavanju i remontu. Sadašnji je pristup prije svega korektivan, kruto propisan i cikličan, a trebao bi biti preventivan i što je moguće više prediktivan, tj. prognostički.

Za potrebe analize stanja elemenata željezničke infrastrukture opisane u ovom radu korišteni su podaci prikupljeni uz pomoć jednog od najsuvremenijih sustava trenutačno dostupnih na tržištu. To je sustav Vehicle/Track Interaction Monitor (*V/TI Monitor*). Za razliku od tradicionalnih mjernih sustava, koji su se prije svega bazirali na mjerenju geometrije kolosijeka, spomenuti mjerni sustav se zasniva na potpuno drugačijem konceptu. Taj sustav, uz pomoć akcelerometara, mjeri vertikalna i horizontalna

(bočna) ubrzanja različitih dijelova vozila, tj. osovinskih slogova, osovinskih postolja i sanduka kola. U tom smislu tendencija rasta brzina i osovinskih opterećenja vlakova pridonijela je da ta ubrzanja koja *V/TI Monitor* mjeri, a koja se javljaju kao posljedica interakcije vozilo/kolosijek, sve više dobivaju na značaju. Samim time je i pozornost sve više usmjerena na nepravilnosti lokalnog karaktera (ljuskanje tračnica, naboranost, oštećenja tračničkih spojeva, nedostatak pričvrstnog pribora, naprsnuća glave tračnice, oštećenja skretnica, itd.). Te nepravilnosti, koje je nadležno osoblje moglo previdjeti, u kombinaciji s prethodno navedenim povećanim brzinama i opterećenjima, mogu proizvesti izuzetno velike udarne sile, čija bi pojava prilikom prolaska velikog broja vozila mogla dovesti do ubrzanog propadanja svih elemenata željezničke infrastrukture s nesagledivim posljedicama, slika 1. [5]. Često se i eksplicitno navodi da udarne sile koje se javljaju kao posljedica lokalnih nepravilnosti na kontaktu kotač/tračnica jesu glavni uzrok propadanja kolosijeka u cjelini [6, 7]. S druge strane, upravo te nepravilnosti označavaju "ciljnu grupu" ili, konkretnije, izvor pobude *V/TI monitor* sustava, čiji će se podaci ovdje analizirati i na temelju koje će se, u skladu s fundamentalnim zakonima dinamike kretanja željezničkog vozila, definirati određeni mehanizmi po kojima dolazi do njihove pojave.

S druge strane, radi boljeg objašnjenja, upotrebu sustava *V/TI monitor* također treba dovesti u vezu i s geometrijom kolosijeka, kao i s tradicionalnim sustavima i vozilima za njeno mjerenje. Kvaliteta geometrije kolosijeka odlučujuće utječe na iznos dinamičkih sila između vozila i kolosijeka, a time i na propadanje ne samo kolosijeka, nego i voznih sredstava. To je razlog zašto se svi tračnički sustavi na svijetu već desetljećima usredotočuju na geometriju kolosijeka i njenu promjenu tijekom vremena i uporabe. Problem geometrije kolosijeka i njene veze s dinamičkim silama je vrlo sličan problemu pojave i razvoja udarnih rupa na cestama - čim se pojave prva odstupanja od projektirane geometrije (što može biti izazvano kako samim



Slika 1. Udio pojedinačnih tipova nepravilnosti u ukupnom broju nezgoda na kolosijecima u SAD-u (razdoblje: 1.1.2010. - 31.12.2015.), prema [5]

dinamičkim silama na kontaktu kotača i tračnice, tako i vanjskim utjecajima, npr. diferencijalnim slijeganjem uslijed problema u donjem ustroju ili zbog neadekvatnog odvodnjavanja, loše geometrije tračničkih spojeva itd.), ona počinju povećavati dinamičke sile, koje opet zauzvrat još više pogoršavaju geometriju kolosijeka. Tako započinje "začarani krug" negativne povratne sprege, gdje geometrija kolosijeka i dinamičke sile imaju uzajamno ubrzavajući učinak. Uslijed tog mehanizma, nekad i naizgled male nepravilnosti u geometriji mogu se vrlo brzo razviti do problema ozbiljnih razmjera, čiji je popravak onda vrlo skup i dugotrajan. Zato je kod tračničkih sustava iznimno važno poznavati lokacije s poremećenom geometrijom, kako bi se mogle poduzeti adekvatne mjere održavanja prije nego što te nepravilnosti porastu i prouzroče velika i skupa oštećenja, kako na kolosijeku tako i na vozilima.

Zbog toga se geometrija kolosijeka već desetljećima redovno mjeri posebnim mjernim kolima. Međutim, njihova izuzetno visoka cijena (više milijuna EUR) uvijek je priječila željezničke uprave da posjeduju brojniju flotu takvih vozila. Zato je uobičajena praksa dimenzionirati flotu tako da se stanje mjeri bar dva puta godišnje, u proljeće i jesen, dok se na prugama za velike brzine i tešku vuču mjerenja obavljaju mnogo češće (obično jednom tjedno, u Europi, ili npr. 16 puta godišnje, u SAD). U posljednje vrijeme, s povećanjem brzina kretanja i osovinskih opterećenja, velik broj željeznica dolazi do zaključka da je ovakva frekvencija mjerenja ipak nedovoljna. Razlog tome je što, zbog uzajamno ubrzavajućeg negativnog učinka geometrijskih nepravilnosti i dinamičkih sila, veći vremenski razmak između mjerenja omogućava znatno veći porast geometrijskih nepravilnosti između dva uzastopna mjerenja. One bi, zbog većeg razmaka između mjerenja, mogle ostati neuočene pravodobno i time puštene da se razviju do razmjera s možda i nesagledivim posljedicama. Zbog toga su se tražila rješenja koja bi osigurala češća mjerenja, ali bez ekstremnih investicija i bez narušavanja voznog reda, jer bi čak i nabavom skupih mjernih kola i povećanjem frekvencije njihovog korištenja, vozni red morao biti narušen. Rješenje je nađeno u upotrebi tzv. "neposjednutih" mjernih sustava, koji se mogu instalirati na sva vozila (lokomotive, putničke i teretne vagoni), a ne samo na mjerna kola. Oni tako, gdje god da se vozilo kreće, konstantno mjere i šalju mjerne podatke preko bežične veze u bazu podataka. Također, u ovu svrhu su odabrane jeftinije verzije mjernih sustava, kao *V/TI Monitor*, koje mjere samo vertikalna i bočna ubrzanja, a koji se zbog niske cijene, mogu instalirati u većem broju i time povećati frekvenciju mjerenja i pokrivenost mreže. U Sjevernoj Americi npr. postoji više od 435 takvih sustava, koji svakog dana mjere oko 107.000 kilometara i šalju izmjerene podatke u centralnu bazu.

U radu je dan kraći opis najvažnijih aspekata sustava *V/TI Monitor*, parametara koje mjeri i tipičnih nepravilnosti kolosijeka koje može identificirati. Objašnjena je struktura i način rada VTI-TQI računalnog programa, koji je specijalno razvijen u svrhu analize mjernih podataka sustava *V/TI Monitora*. Detaljno je prikazana analiza podataka primjenom VTI-TQI programa, uz

nekoliko karakterističnih situacija koje su otkrivene tijekom ove analize, s posebnim osvrtom na učinak skretnica i križališta, kao i mogućnost generiranja i upotrebu trendova u VTI-TQI programu za prognozu budućih vrijednosti parametara koje mjeri *V/TI Monitor*.

2. Analiza kvalitete kolosijeka pomoću sustava *V/TI Monitor*

Glavni je cilj upotrebe sustava *V/TI Monitor* taj da se, takvim relativno jednostavnim i jeftinim sustavom, identificiraju lokacije na mreži na kojima postoje povišene vrijednosti ubrzanja, koje daju povišene vrijednosti dinamičkih sila i koje svojim ubrzanim rastom tijekom vremena mogu dovesti do ozbiljnih i skupih oštećenja kako infrastrukture tako i voznih sredstava. Za razliku od tradicionalnog mjerenja geometrije kolosijeka mjernim kolima, ovdje nije cilj apsolutno precizno izmjeriti geometrijske devijacije, već da se na čitavoj željezničkoj mreži, koja je obično veoma velika, na objektivan, jednostavan i jeftin način pronađe onih 10 % ili 20 % najkritičnijih lokacija koje i imaju najveći prioritet. Važno je razumjeti da *V/TI Monitor* i standardna vozila za mjerenje geometrije kolosijeka provode inspekciju geometrije kolosijeka iz različitih perspektiva, ali koje su u svakom slučaju međusobno komplementarne. Standardni sustavi za mjerenje geometrije kolosijeka su izravni i objektivni. S druge strane, *V/TI Monitor* mjeri stanje kolosijeka na temelju ponašanja vozila koje nastaje kao posljedica interakcije s kolosijekom. Zajednička primjena navedenih sustava pridonosi dobivanju kompletne slike stanja određenog kolosijeka.

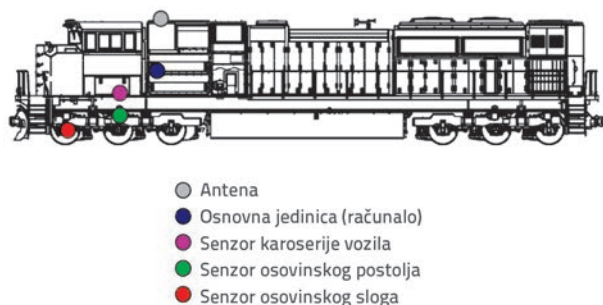
Sekundarni je cilj primjene sustava *V/TI Monitor*, osim identifikacije problematičnih lokacija analizom mjernih podataka, definirati odgovarajuće aktivnosti na održavanju kolosijeka koje bi adekvatno popravile stanje kolosijeka i spriječile njegovo daljnje propadanje, kao i njegov daljnji štetan utjecaj na propadanje voznih sredstava. Iz tog razloga, uobičajeni očekivani rezultati primjene mjerenja sustavom *V/TI Monitor* i analize izmjerenih podataka jednostavno uključuju:

- dobivanje liste i točnih pozicija lokacija na kojima postoje problemi s geometrijom tračnice i kolosijeka i povišene razine dinamičkih sila na kontaktu kotača i tračnice,
- definiranje razine užurnosti identificiranih problematičnih lokacija, s naznakom sklonosti prema daljnjem pogoršanju stanja.
- predlaganje mjera održavanja koje je potrebno poduzeti za otklanjanje problema i njihova prava prednosti prema razini hitnosti.

2.1. *V/TI Monitor* sustav

Sustav *Vehicle/Track Interaction Monitor (V/TI Monitor)* svoje prve korake bilježi u okviru zajedničkog projekta tvrtki *ENSCO, Federal Railroad Administration (FRA)* i *Amtrak* (korporacija koja pruža usluge putničkog željezničkog prijevoza za srednje i daleke međugradske relacije u SAD-u), koji je kasnih 90-ih godina 20.

stoljeća rezultirao i partnerstvom između navedenih kompanija. Taj sustav koristi niz senzora koji na vrlo precizan način opisuju dinamičko ponašanje vozila u interakciji vozilo - kolosijek. Standardna jedinica *V/TI Monitor* (računalo) (slika 2.) instalirana na samom vozilu, putničkom i teretnom, sastoji se od glavnog kućišta u kojem je uskladištena cjelokupna elektronika, pet akcelerometara i jedna eksterno montirana antena pomoću koje se izvodi GPS pozicioniranje i osigurava telefonska komunikacija [8].



Slika 2. Standardna jedinica *V/TI Monitor* (računalo) [8]

Svaki od navedenih akcelerometara obavlja kontinuirano mjerenje, a kada bilo koja od izmjerenih vrijednosti prekorači dopuštenu graničnu vrijednost (definiranu od strane nadležne željezničke uprave), ona se označava kao nepravilnost, koju dalje definiraju sljedeće informacije:

- vrijeme mjerenja dane nepravilnosti
- GPS (*Latitude/Longitude*) koordinate
- vrijednost nepravilnosti
- prikaz podataka s ostalih senzora nastalih u intervalu od 4 sekunde, tj. dvije sekunde prije i dvije sekunde nakon registriranja dane nepravilnosti.

Na osnovi vrijednosti same nepravilnosti zatim se određuje i njezina ozbiljnost/hitnost, pri čemu su definirane tri razine urgentnosti:

- **Urgent:** detaljna inspekcija mora se provesti u iduća 24 h
- **Near Urgent:** inspekcija se provodi idućih 7 dana
- **Priority:** inspekcija se obično provodi u idućih 30 dana, ili se inspekcijski podaci koriste za predviđanje budućeg ponašanja kolosijeka.

Za svaki je od pet akcelerometara rezerviran po jedan kanal mjernog uređaja i jedno polje u bazi podataka, pri čemu svaki akcelerometar mjeri određeni tip nepravilnosti:

- **CarBody Vertical (CBV):** vertikalno ubrzanje sanduka vozila
- **CarBody Lateral (CBL):** bočno ubrzanje sanduka vozila
- **Truck Lateral (TRL):** bočno ubrzanje osovinskog postolja
- **Axle vertical impact (AXV1, AXV2):** ubrzanje osovinskog sloga mjereno pojedinačno za lijevu i desnu stranu osovinskog sloga na osnovi kojeg se, posebnim algoritmom obrade podataka u realnom vremenu koji koristi poznata osovinska opterećenja i neogibljene mase vozila na kojem je

instaliran VTI uređaj, izračunavaju udarne sile na kontaktu kotač/tračnica)

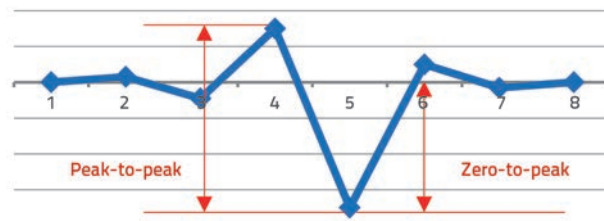
- **Mid-chord Offset MCO_1 , MCO_2 :** Mjerenje strelice tetive luka dužine 3 m, vertikalne geometrije kolosijeka ("stabilnost") lijeve i desne tračnice

U tablici 1. sažeto su prikazane sve nepravilnosti koje se mjere ovim sustavom, kao i potencijalni uzroci njihovog nastanka [9, 10]. Važno je znati da se vertikalna (CBV) i lateralna (CBL) ubrzanja karoserije vozila mjere pomoću senzora pozicioniranih u razini poda i osi željezničkog vozila. Ta ubrzanja predstavljaju maksimalne *peak-to-peak* ("vrh-vrh") (slika 3.) vrijednosti ubrzanja u intervalu od jedne sekunde. Nepravilnosti ovog tipa obično su povezane s nepravilnostima u vertikalnoj geometriji (stabilnost) i horizontalnoj geometriji (smjer) kolosijeka.

TRL senzor mjeri lateralna ubrzanja osovinskog postolja. Vrijednosti ovih prekoračenja se dobivaju kao korijen srednje vrijednosti kvadrata (eng. *Root Mean Square* - RMS) izmjerenih ubrzanja u intervalu od dvije sekunde, a koja su općenito posljedica vijugavog (eng. *hunting*) sinusoidnog kretanja vozila kolosijekom. AXV senzori, instalirani na kućištu osovinskog sloga, pojedinačno za lijevu i desnu stranu, mjere ubrzanja u vertikalnoj ravni. Proračun udarnih sila na kontaktu kotač/tračnica (AXV1 i AXV2) provodi se na osnovi ubrzanja, poznatog statičkog opterećenja kotača i neogibljene mase vozila na kojima je instaliran sustav *V/TI Monitor*.





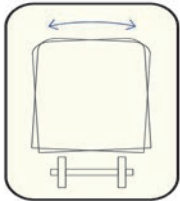



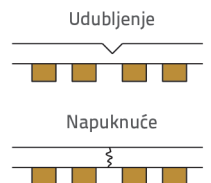



Treba napomenuti da je ovo pojednostavljen pristup, jer za udarne sile koje nastaju u veoma kratkom vremenskom intervalu (manje od 1/100 s), vrijednost će efektivne mase najvjerojatnije biti manja budući da savijanje osovine sloga i posljedično krivljenje kotača uzrokuje da se ovi elementi ponašaju kao opruge radi izolacije pogonskog sustava od AXV ubrzanja (tj. izvedenih udarnih sila) registriranih s obje strane osovinskog sloga. S druge strane, udarne sile s nešto dužim intervalom djelovanja, dovesti će do toga da stvarna sila bude zaista nešto veća s obzirom na tradicionalni inercijalni odgovor okvira obrtnog postolja i karoserije vozila. U zavisnosti od krutosti primarnog ogibljenja i intervala trajanja ovog utjecaja, i dobivene vrijednosti mogu varirati od slučaja do slučaja.

Na kraju, spomenuti senzori osovinskog sloga se koriste i za proračun vertikalnog profila kolosijeka, pri čemu se za mjernu bazu (tetiva luka) uzima dužina od 3 m. Ovo je sasvim nov pristup, koji je prvi put upotrebljen od Union Pacific željeznice a sve u cilju iskorištavanja već prikupljenih podataka [10].



Slika 3. Shematski prikaz "Peak-to-Peak" i "Zero-to-Peak" vrijednosti signala

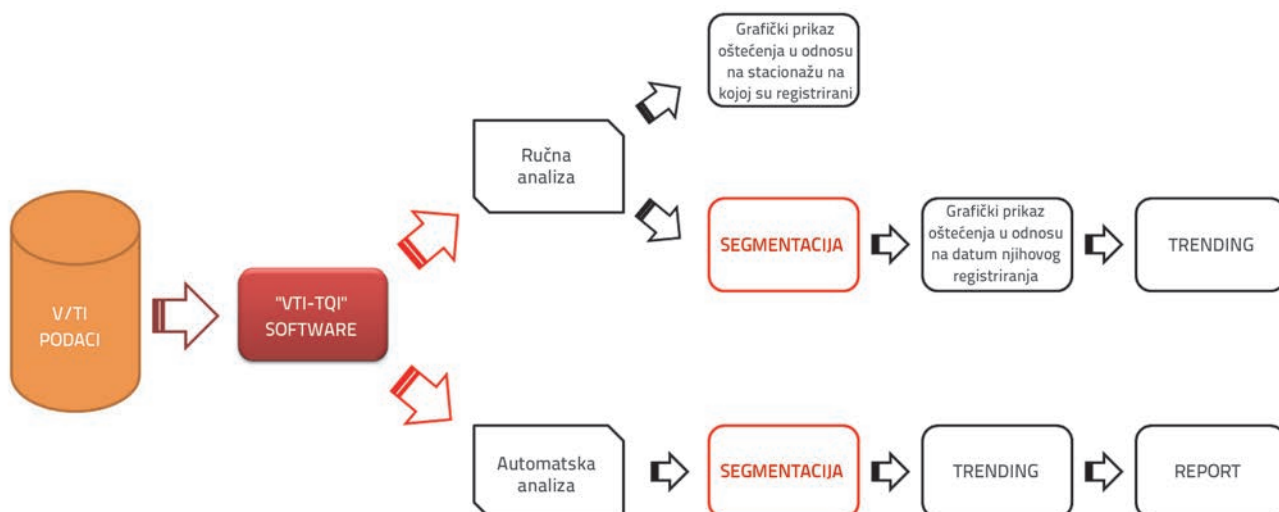
Tablica 1. Sažeti prikaz nepravilnosti mjerenih sustavom V/TI Monitor i njihovih potencijalnih uzroka [9]

Tip nepravilnosti	Obratiti pažnju na:		Primjer
CBV Carbody Vertical <i>(Vertikalno ubrzanje sanduka vozila)</i>		<ul style="list-style-type: none"> Kratkovalne nepravilnosti vertikalne geometrije kolosijeka Zablačen zastor, pojava pumpanja / "prskavaca" 	
CBL Carbody Lateral <i>(Bočno ubrzanje sanduka vozila)</i>		<ul style="list-style-type: none"> Nepravilnosti u pogledu horizontalne geometrije kolosijeka 	
CBR Carbody Roll <i>(Bočno naginjanje sanduka vozila)</i>		<ul style="list-style-type: none"> Nepravilnosti u pogledu geometrije sastava tračnica Vezani isključivo za kolosijeke namijenjene teretnom prometu 	
TRL Truck Lateral <i>(Bočno ubrzanje osovinskog postolja)</i>		<ul style="list-style-type: none"> Vijugavo kretanje vozila Istrošeni kotači vozila, istrošena ogibljenja 	
AXV1 i AXV2 Axle Vertical Impact <i>(Ubrzanje osovinskog sloga mjereno pojedinačno za lijevu i desnu stranu osovinskog sloga)</i>		<ul style="list-style-type: none"> Upozorava na puknuća tračnica, oštećenja sastava tračnica, oštećenja srčišta skretnica, nedostatak elemenata pričvršćenja, itd. 	
MCO1 i MCO2 10-Foot Mid-Chord Offset Vertical Profile <i>(Mjerenje strelice tetive luka dužine 3 m vertikalne geometrije kolosijeka, "stabilnost", lijeve i desne tračnice)</i>		<ul style="list-style-type: none"> Zablačen zastor, pojava pumpanja / "prskavaca". Neadekvatno oslanjanje kolosijeka na mjestima sastava tračnica 	

2.2. Računalni program "VTI/TQI" za ocjenu stanja kolosijeka

Velik broj sustava V/TI Monitor, kao npr. u Sjevernoj Americi, pogotovo promatran tijekom dužega razdoblja, proizvodi golemu količinu podataka, koju je veoma teško integrirano obraditi bez odgovarajućeg računalnog programa. Takav program pogotovo

postaje prijeko potreban ako se želi promatrati dugoročno ponašanje izmjerenih parametara, u smislu definiranja trendova, a što predstavlja osnovni preduvjet za *condition-based* upravljanje radovima na održavanju i remontu. Kako je u okviru analiza opisanih u ovom radu obrađeno više od tri milijuna nepravilnosti, zabilježenih tijekom tri i više godina, za potrebe provedbe ovih analiza nad tako velikom količinom



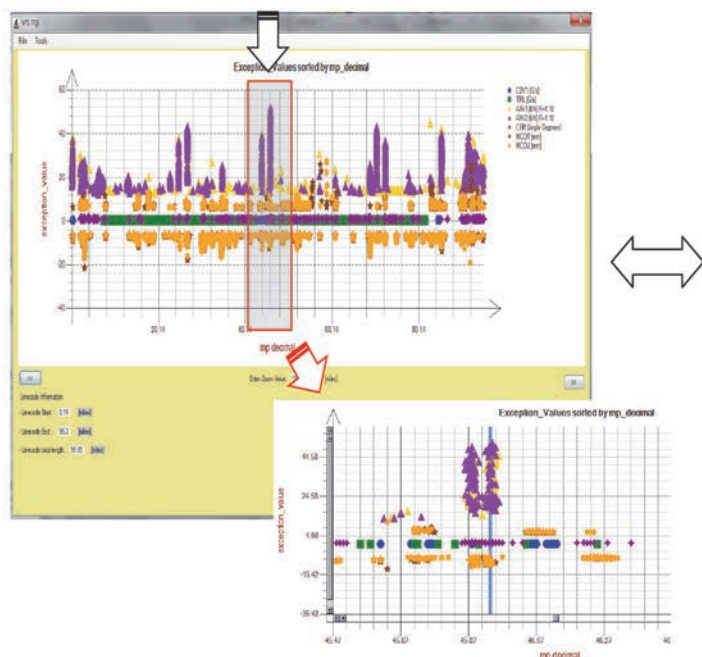
Slika 4. Koncept VTI-TQI (Vehicle Track interaction-Track Quality Index) računalnog programa [1]

podataka razvijen je poseban računalni program pod nazivom *Vehicle Track interaction-Track Quality Index (VTI-TQI)*. Program je izrađen uz pomoć jednog od sada najpopularnijih programskih jezika za izradu *Windows* i *Web* aplikacija, *Visual Basic 2010*, tako da se cjelokupan kod programa zasniva na tzv. *objektnom programiranju (OOP-Object Oriented Programming)*, koje predstavlja posljednju generaciju modernog programiranja. Za potrebe baze podataka, koja je trebala prihvatiti spomenutih oko 3.000.000 nepravilnosti, vezanih za ukupno 25 razmatranih dionica koje se prostiru na ukupno 1.700 milja (približno oko

3.000 kilometara), koristi se *Microsoft-ov* alat iz *Office* paketa *Access 2010*. Kao podrška vizualizaciji podataka, korištena je *MS Chart* kontrola, izuzetno moćan alat integriran u sklopu *VB.Net* platforme, koji pruža odlične mogućnosti u smislu upravljanja podacima. Zahvaljujući širokom spektru funkcija koje ova kontrola posjeduje, stvoreni su uvjeti za provođenje detaljne analize.

VTI-TQI program karakteriziraju dva moda, slika 4., (1) ručni i (2) automatski. Nužna manualna analiza, čiji bi konačan rezultat trebao biti definirani model propadanja kolosijeka i optimalna

Pozicija prikazanog segmenta u okviru razmatranog kolosijeka - ukupna dužina prikazanog kolosijeka = 100 milja, tj. = 160 km



Uvećan položaj prikazanog segmenta - ukupna dužina prikazanog kolosijeka = 1 milja, tj. = 1,60 km



Segmentni prikaz nepravilnosti tijekom vremena - odnosi se na segment kolosijeka dužine 0.02 milje, tj. = 32 m

Slika 5. Vizualizacija podataka u okviru VTI-TQI računalnog programa [1]

dužina segmenta kolosijeka koji se koristi za dalju automatsku analizu, provodi se za svaku dionicu kolosijeka pojedinačno. Analiza se dalje dijeli na dvije faze:

Prva faza - Korisnik dobiva grafički prikaz nepravilnosti na odabranom kolosijeku sortiranih po stacionaži, *slika 5. lijevo*

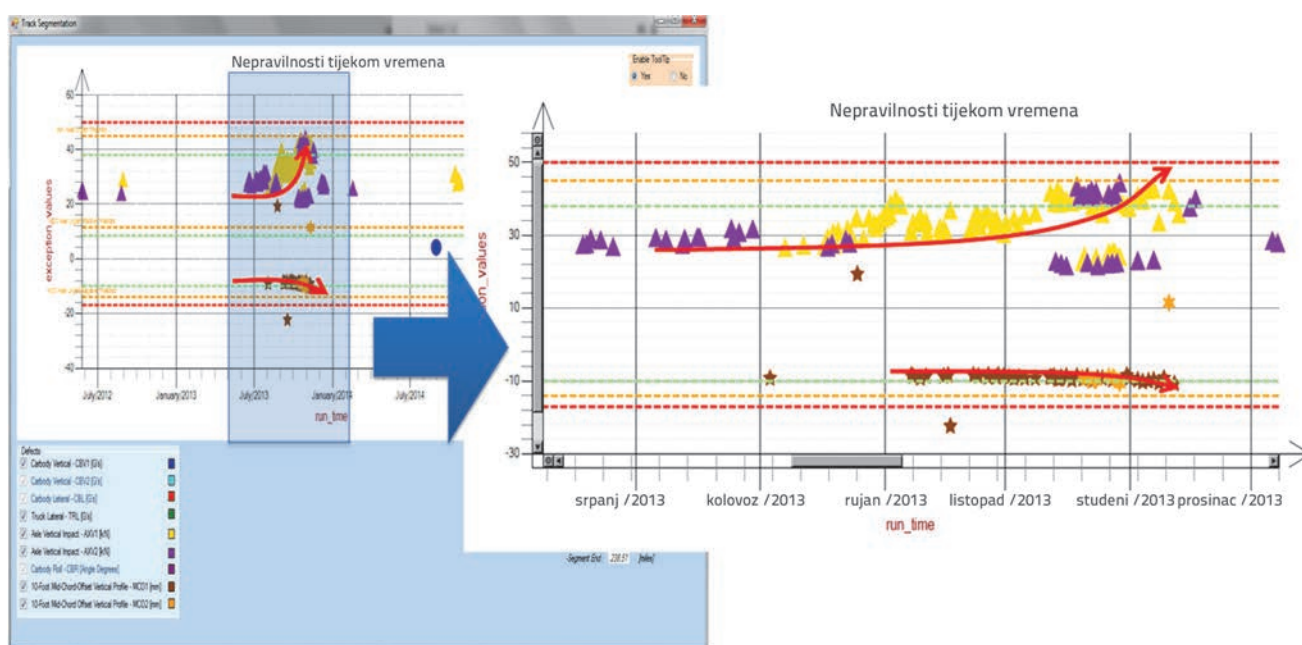
Druga faza - Segmentacija [11] podataka vezanih za odabrani kolosijek i razmatranje željenih lokacija kroz segmente, u kojima su nepravilnosti prikazane zavisno o vremenu njihova registriranja - tzv. *segmentni prikaz*, *slika 5. desno*.

Segmentacija kolosijeka predstavlja "kamen temeljac" *condition-based* pristupa u smislu automatske analize željezničkih mreža većih razmjera. Koncept procesa segmentacije je detaljno objašnjen u radovima [2-4, 11, 12]. Za potrebe ovog rada i objašnjenja analize podataka *V/TI Monitor* dovoljno je navesti da segmentacija u suštini samo predstavlja proces diskretizacije linearnih/prostornih elemenata željezničke infrastrukture i time njihovo "pretvaranje" u singularne, diskretne objekte, s konačnom (kraćom) dužinom, pogodna za automatsku analizu. Iako ova definicija može zazvučati prilično jednostavno, koncept segmentacije, u svom punom opsegu veoma je kompleksan. Potreba za segmentacijom je nastala iz razloga nemogućnosti provođenja adekvatne automatske i sustavne analize linearnih/prostornih objekata (npr. tračnica, zastora, kontaktnog voda, itd.), koji obično imaju veoma veliku dužinu. Problem je bio u tome što su se duž njih uvijek jasno mogli uočiti dijelovi u različitom stanju, tj. koji su imali različito ponašanje, te su zahtijevali odvojeno razmatranje, zbog čega se nijedan od takvih objekata nije mogao uzeti u svojoj cijelosti u analizu. Zato su se takvi objekti morali podijeliti na dijelove, segmente (otud i naziv *segmentacija*), koji bi u što većoj mogućoj mjeri, čitavom svojom dužinom imali ujednačeno ponašanje. Time je omogućeno da

se kolosijek dalje sekvencijalno analizira, segment po segment, ali na identičan način, što predstavlja osnovni preduvjet svake automatske analize. Ovakav cilj jasno je upućivao na dijeljenje linearnih objekata na dijelove s ujednačenim karakteristikama, jer su one u najvećoj mjeri jamčile i ujednačeno ponašanje. Problem je nastao u tome što je broj linearnih objekata, kao i broj i raznovrsnost njihovih karakteristika koje su utjecale na njihovo ponašanje bio veoma velik, tako da bi se i sama definicija principa segmentacije ozbiljno zakomplicirala.

Kod modernih programa za upravljanje održavanjem željezničke infrastrukture (eng. *Railway Infrastructure Asset Management Systems* - RI-AMS) [2-4, 11, 12] primjenjuje se isključivo tzv. fleksibilna ujednačena segmentacija, kod koje je dužina segmenta promjenljiva/fleksibilna upravo radi dobivanja segmenata sa što ujednačenijim karakteristikama, tj. ponašanjem. Međutim, za potrebe analize podataka pomoću sustava *V/TI Monitor*, takav se pristup nije mogao primijeniti jer on - za razliku od standardnih mjernih kola za geometriju kolosijeka koja kontinuirano mjere i bilježe izmjerene vrijednosti - proizvodi podatke samo za one lokacije na kojima su otkrivene određene nepravilnosti, a za ostale ne bilježi nikakve vrijednosti. Primjena fleksibilne uniformne segmentacije na podatke *V/TI Monitor* proizvela bi veliki broj "praznih" segmenata, tj. segmenata na kojima ne bi bilo nikakvih izmjerenih vrijednosti, dok bi na onim lokacijama na kojima nepravilnosti jesu zabilježene, standardna minimalna dužina fleksibilnih ujednačenih segmenata koje koriste RI-AMS sustavi (od približno 200 m), sadržavala prevelik broj *V/TI Monitor* nepravilnosti, koje bi tako bile "uprosječene", čime bi se izgubila "oštrica" analize i sve koristi od visoke preciznosti mjerenja *V/TI Monitor* uređaja.

S obzirom na to, odlučeno je da dužina segmenta za analizu *V/TI Monitor* parametara bude značajno manja od minimalne koja se uobičajeno koristi kod RI-AMS sustava, a konačna



Slika 6. Veliko povećanje udarnih dinamičkih sila u relativno kratkom vremenskom intervalu [1]

dužina segmenata od ~32 m (0,02 milje) usvojena je na osnovi rezultata i iskustava prethodne analize *V/TI Monitor* podataka [9]. Dodatno, i lokacijska preciznost *V/TI Monitor* sustava je fiksirana na 0.01 milju (~16 m), tako da je najlogičnija dužina, koja bi omogućila lako upravljanje podacima u okviru same baze, bila cjelobrojna vrijednost dužine od 0,01 milje, što je direktno upućivalo na dužinu segmenta od ~32 m ($2 \times 0,01 = 0,02$ milje).

Ako bi se govorilo o procesu definiranja modela propadanja, analiza stanja kolosijeka na osnovi prikaza nepravilnosti po stacionaži bila bi prilično nepouzdana. Glavna "uloga" ovakvih prikaza je omogućiti korisniku orijentaciju u prostoru i spoznavanje koji su dijelovi kolosijeka najkritičniji, dok se stvarni uzroci propadanja mogu isključivo utvrditi kroz spomenuti *segmentni prikaz*. Jedino tada bi se mogao na adekvatan način definirati njihov model propadanja i prognozirati njihovo ponašanje u budućnosti, a samim tim odrediti trenutak kada će to ponašanje zahtijevati intervencije u pogledu održavanja i remonta. S tim u vezi, program omogućava iscrtavanje trendova i graničnih vrijednosti određenih razina urgentnosti definiranih od strane nadležnog osoblja željeznice, (slika 5, gore desno i slika 6.). Vodeći se osnovnim pravilima o izboru tipa trenda, praćena je promjena vrijednosti svakog od parametara u funkciji vremena. Tom prilikom je uočeno da linearni trend u većini slučajeva veoma dobro aproksimira ponašanje parametara, slika 5., gore desno, tj. njihov rast tijekom vremena. Iako je ovakvim pristupom u većini situacija na pravilan način uspostavljena zavisnost između datih podataka, važno je reći da su uočena i određena odstupanja gdje je prirast vrijednosti nepravilnosti između uzastopnih mjerenja bio mnogo brži, što svakako upućuje na nelinearni trend, pa stoga zahtijeva dodatnu pažnju i oprez, slika 6. Planirano je da će se ovaj aspekt detaljnije analizirati u daljnjim istraživanjima.

Situacije kao na slici 6., u kojima dolazi do vrlo brzog povećanja AXV i MCO nepravilnosti, na pravi način prezentiraju prednosti sustava *V/TI Monitor* i količine podataka koje je njime moguće prikupiti. Kao što možemo vidjeti iz priloženog, udarne sile su u vrlo kratko vrijeme (srpanj-studen 2013.) prešle put od vrijednosti koja se nalazi ispod razine prioritarnog održavanja do vrijednosti koja prekoračuje limit definiran hitnim održavanjem. Iako se tijekom analize nije mogao susresti velik broj segmenata sa sličnim ponašanjem, nužno je imati na umu da su takve situacije moguće, i sasvim sigurno prisutne, što svakako zahtijeva poseban tretman od strane nadležnog osoblja zaduženog za održavanje željezničke infrastrukture.

Algoritam automatske analize je konceptualno identičan prethodno opisanoj manualnoj analizi, gdje se na osnovi nepravilnosti otkrivenih na danom segmentu pruge generira

Segment/Defects	MAX	AVG	Percentile	Urgent Date	Near Urgent Date	Priority Date
TRL	Priority	Good	Good	3/31/2019 11:38:14 PM	5/1/2019 5:54:58 AM	1/17/2017 5:04:58 AM
AXV1	Priority	Good	Good	8/16/2019 1:31:31 PM	5/31/2019 2:41:07 AM	9/21/2016 11:30:34 AM
AXV2	Near Urgent	Good	Good	Infinite	Infinite	Infinite
CBR	Good	Good	Good	3/13/2020 7:10:07 PM	7/20/2018 8:13:19 AM	5/8/2016 1:37:36 AM
MCO1_Negative	Good	Good	Good	10/16/2017 5:31:48 PM	11/7/2016 10:14:30 PM	8/8/2015 8:31:25 PM
MCO2_Negative	Good	Good	Good			
Segment number: 2289 (45.91 - 45.92)						
CBV1						
CBL						
TRL						
AXV1	Priority	Good	Good	7/2/2017 1:13:37 PM	1/13/2017 7:30:35 PM	5/21/2016 4:18:20 AM
AXV2	Near Urgent	Good	Good	Infinite	Infinite	Infinite
CBR	Good	Good	Good	Infinite	Infinite	Infinite
MCO1_Negative	Good	Good	Good	1/6/2018 2:15:28 PM	12/18/2016 12:11:37 AM	7/24/2015 5:26:29 AM
MCO2_Negative	Good	Good	Good	4/19/2020 8:21:24 PM	8/23/2018 9:47:08 PM	6/9/2016 7:41:27 AM
Segment number: 2290 (45.93 - 45.94)						
CBV1						
CBL						
TRL						
AXV1	Near Urgent	Good	Good	2/8/2017 10:14:01 PM	7/13/2016 3:25:36 PM	9/23/2015 5:53:48 AM
AXV2	Urgent	Good	Near Urgent	1/15/2018 8:11:02 PM	4/2/2017 7:08:55 PM	2/24/2016 12:53:58 PM
CBR	Good	Good	Good	Infinite	Infinite	Infinite
MCO1_Negative	Good	Good	Good	4/3/2019 3:15:21 AM	10/4/2017 5:19:12 AM	10/7/2015 8:04:19 AM
MCO2_Negative	Good	Good	Good	8/27/2018 2:33:21 AM	5/9/2017 9:25:18 PM	8/16/2015 2:34:35 PM
Segment number: 2291 (45.95 - 45.96)						
CBV1						
CBL						
TRL						
AXV1	Near Urgent	Good	Good	10/10/2016 1:10:10 PM	12/6/2015 5:54:00 PM	9/30/2014 10:07:22 AM
AXV2	Near Urgent	Good	Good	4/18/2017 7:37:15 PM	10/18/2016 9:27:53 PM	2/7/2016 4:50:47 AM
CBR	Good	Good	Good	Infinite	Infinite	Infinite
MCO1_Negative						

Slika 7. Prikaz izvještaja generiranog automatskom analizom [1]

linearni trend tijekom promatranog vremena i izračunava trenutak kada će taj trend dostići odgovarajuću graničnu vrijednost definiranu od strane željeznice na čijoj se mreži izvode mjerenja *V/TI Monitor*. Podrazumijeva se da se korisnik tijekom manualne analize upoznao sa stanjem u kome se nalazi dotični kolosijek i stoga se od njega u okviru automatske analize očekuje samo da definiira dužinu segmenata (gdje je po *defaultu* ponuđena dužina od 0.01 milje), granične vrijednosti za sve parametre koje *V/TI Monitor* mjeri i određena *pravila odlučivanja* po kojim će se analizirati njihovo stanje. Rezultati procesa automatske analize se dobivaju u tabličnom obliku (slika 7.), na osnovi koje se dalje mogu provoditi određena planiranja radova na održavanju i remontu.

3. Analiza podataka primjenom *V/TI-TQI* programa

Duž analiziranih trasa kolosijeka otkriven je iznimno velik broj situacija koje su dalje, svaka zasebno, zahtijevale detaljniju analizu. U ovom će se radu prikazati samo one koje su ocijenjene kao najreprezentativnije i na temelju kojih će se u skladu s osnovnim zakonima dinamike kretanja željezničkog vozila uspostaviti određene hipoteze, fokusirajući se pri tom uglavnom na one nepravilnosti koje su najinteresantnije za željeznice - udarne dinamičke sile. Ove sile, zabilježene kao AXV nepravilnosti (vertikalna ubrzanja osovinog sloga i s njima povezane dinamičke sile na kontaktu kotača i tračnice) u okviru sustava *V/TI Monitor* i temeljem njih izvedene MCO nepravilnosti (vertikalna geometrija kolosijeka s dužinom mjerne tetive od 3 m), predstavljaju *apsolutna mjerenja*. Ona u najmanjoj mjeri ovise o karakteristikama samog vozila, tj. primarnih i sekundarnih progiba, pa je s toga najveća pažnja usmjerena upravo prema ovoj vezi. AXV nepravilnosti se u prvom redu odnose na neogibljene mase, pa samim tim i indiciraju lokalne, izolirane lokacije, i kratkovalne nepravilnosti kao što su sastavi tračnice (mehanički i zavareni), "neželjeni spojevi" prouzročeni pucanjem tračnica, mjestimična ulegnuća na površini glave tračnice (ljuskanje glave

tračnice - *shelling*) i tzv. *Squat* nepravilnosti ili opekline uslijed proklizavanja pogonskih kotača lokomotiva - *wheel burns*). S druge strane, MCO nepravilnosti, kao i vrijednosti sila dobivenih na kontaktu kotač/tračnica, izračunavaju se iz AXV ubrzanja. Naravno, iako se MCO nepravilnosti izvode iz AXV ubrzanja, to ne znači da AXV nepravilnosti moraju nužno biti praćene MCO nepravilnostima. Načelno, kao što je već i navedeno, AXV udarne sile na kontaktu kotač/tračnica i MCO nepravilnosti potječu od istog AXV signala. AXV nepravilnosti se, za razliku od MCO nepravilnosti koje se dobivaju dvostrukom integracijom, identificiraju obradom *peak-to-peak* vrijednosti AXV signala, dok se za potrebe proračuna AXV udarnih sila na kontaktu kotač/tračnica koriste maksimalne vrijednosti "naniže" (*zero-to-peak*, slika 3.).

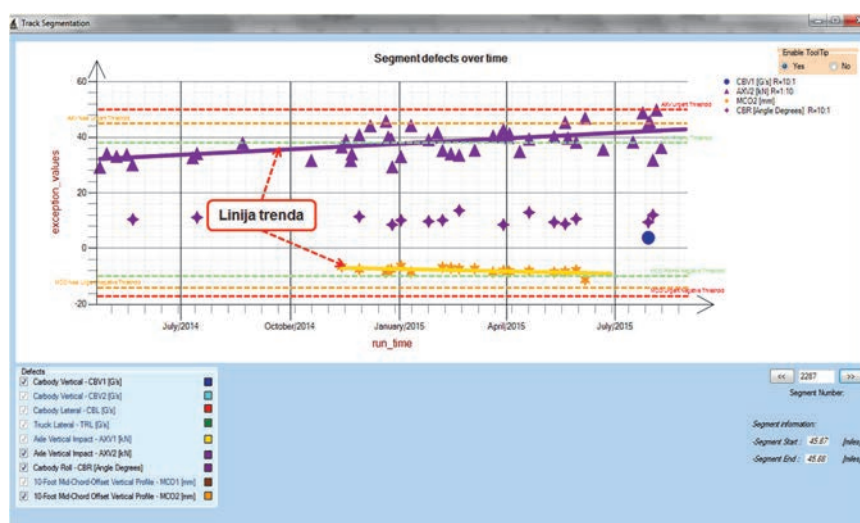
3.1. Generiranje i upotreba trendova u VTI-TQI programu

Radi boljeg objašnjenja i razumijevanja prikazanih karakterističnih problema otkrivenih VTI-TQI programom, potrebno je kratko prethodno objasniti jednu od njegovih bitnih karakteristika. To je mogućnost kreiranja i upotrebe trendova. Naime, u potpoglavlju 1.2 u kome je dan opis VTI-TQI programa i kroz potpoglavlje 3.2 u kome su analizirani različiti tipovi nepravilnosti pojedinačno, može se vrlo lako zaključiti da je možda i najveći doprinos VTI-TQI programa upravo njegova sposobnost modeliranja i prikazivanja ponašanja segmenata kolosijeka u prošlosti, preko bilo kojeg od VTI Monitor parametra (ili bilo koje njihove kombinacije) i predviđanja njihovog ponašanja u budućnosti. Iz tog će se razloga u okviru ovog potpoglavlja usmjeriti pozornost upravo na koncept definiranja trendova za svaki parametar. Na osnovi ovog koncepta, u okviru VTI-TQI programa formirana je posebna procedura (*rutina*), koja u okviru svakog segmenta obavlja grupiranje nepravilnosti po tipovima i njihovo svrstavanje po datumu njihova registriranja. Za svaku od navedenih grupa, program računa koeficijente jednadžbe linearnog trenda. Koristeći granice za pojedine razine održavanja definirane od strane nadležnog osoblja željeznice, koje zapravo predstavljaju graničnu vrijednost na y-osi i dobivenom jednadžbom linearnog trenda, dobiva se sustav od dvije jednadžbe s jednom nepoznanicom. Jednostavnim ubacivanjem vrijednosti granice održavanja

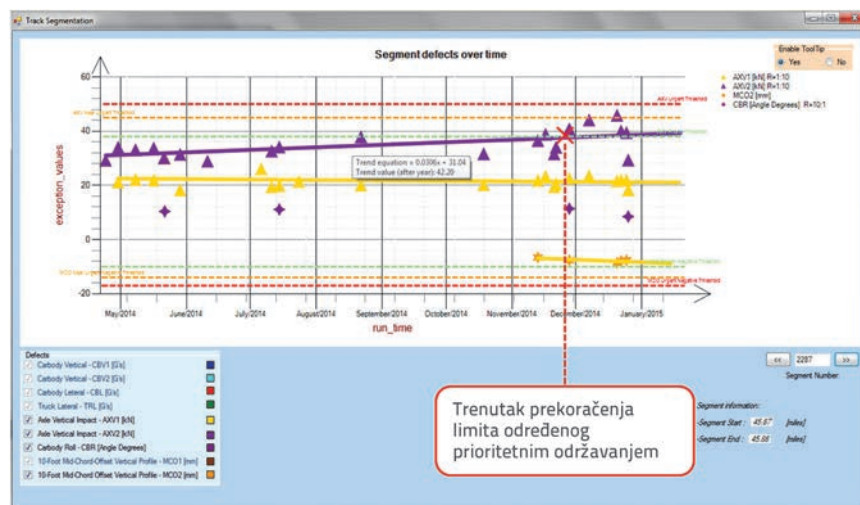
dobiva se trenutak prekoračenja ovog limita za dani parametar u budućnosti.

U tom smislu, prateći slike 9. i 10. simulirat će se uz pomoć VTI-TQI programa situacija u kojoj će se za jedan te isti segment promatrati nepravilnosti zabilježene u prvoj godini mjerenja i generirati trend. Kako bi se provjerila pouzdanost primjene linearnog trenda, vrijednosti na koje ukazuje linija trenda usporedit će se sa stvarno izmjerenim pomoću VTI Monitor sustava u sljedećoj godini. Nepravilnosti koje pripadaju segmentu prikazanom na slici 8., a odnose se na mjerenja izvršena do kraja 2014. godine, prikazane su na slici 9.

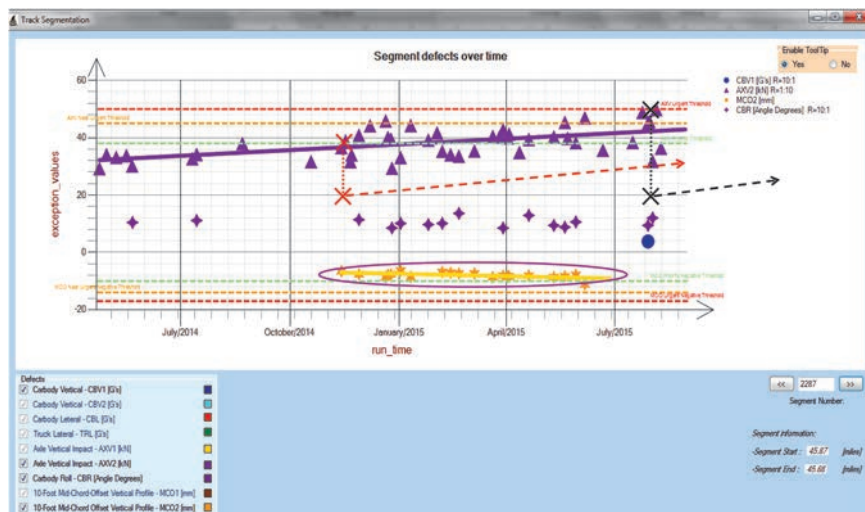
Kao što se može primijetiti, u promatranih nekoliko godina, prognozirane i izmjerene vrijednosti se razlikuju veoma malo. U okviru *tooltipa* prikazanog na slici 9. (sivi prozor) može se vidjeti parametarski oblik jednadžbe trenda i vrijednost ove nepravilnosti nakon godinu dana. Ove informacije se u svakom trenutku mogu dobiti jednostavnim prelaskom pokazivačem miša preko željene linije trenda. Podatak koji se odnosi na vrijednost nepravilnosti



Slika 8. Prikaz segmenta s generiranim trendom [1]



Slika 9. Prikaz segmenta (slika 8.) s nepravilnostima registriranim tijekom 2014. godine [1]



Slika 10. Modeliranje propadanja segmenta primjenom VTI-TQI računalnog programa [1]

nakon godinu dana daje vrijednost od 41.86, tj. 418.60 kN, s obzirom na to da su nepravilnosti koje predstavljaju udarne sile na kontaktu kotač/tračnica prikazane u odnosu 1:10 (što je navedeno u okviru legende grafike). Na osnovu toga se može doći do zaključka da ova vrijednost zaista odgovara vrijednostima koje su realno zabilježene kasnijim *V/VI Monitor* mjerenjima u tom periodu.

Da je u trenutku registracije prve nepravilnosti na ovom segmentu postojala podrška *VTI-TQI* programa, situacija bi se mogla razviti u potpuno drugom smjeru, zavisno od odluka donesenih od strane upravitelja na danoj željeznici zaduženih za upravljanje željezničkom infrastrukturom. Na slici 10. crvena crtkana linija predstavlja hipotetičko propadanje kolosijeka na danom segmentu u slučaju primjene *VTI-TQI* programa, gdje bi obavljenom analizom bilo zaključeno da je potrebno izvršiti odgovarajuće radove na održavanju. Kao što se može vidjeti, ovakvim pristupom bi se situacija bitno razlikovala, jer bi se takvom intervencijom u trenutku prekoračenja prioritarnog održavanja izbjeglo dostizanje razine hitnog održavanja od strane udarnih sila na kontaktu kotač/tračnica. Štoviše, izvođenjem ovih radova, kao izravne posljedice analize pomoću *VTI-TQI* programa, i poremećaji u vertikalnoj geometriji kolosijeka (ružičast oval) također bi izostali, što bi izravno utjecalo i na pojavu CBR nepravilnosti (ljubičasti romboidi), tj. eliminirali bi mogućnost njihove pojave. Dakle, koristi od pravilne i pravodobne upotrebe programa kao *VTI-TQI* bili bi ne samo vidljivi i vrijedni, već i višestruki.

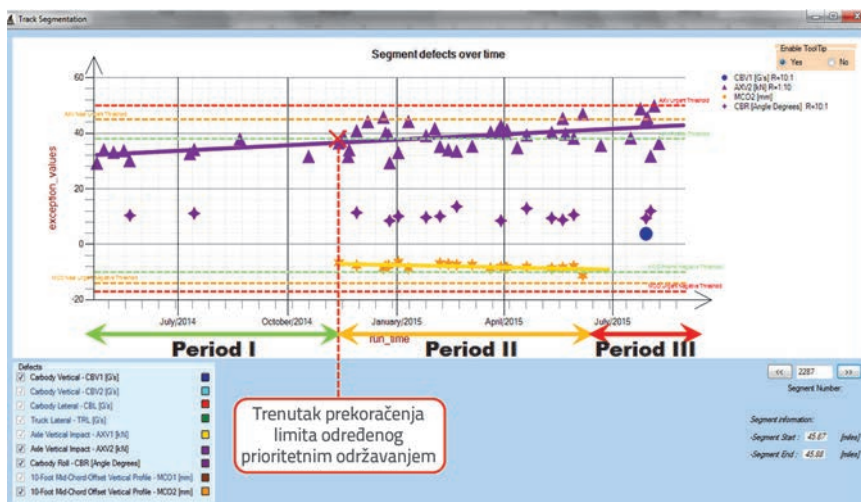
Druga mogućnost, ujedno i mnogo zahtjevnija u pogledu potrebnih intervencija, bila bi ona predstavljena pomoću crne crtkane linije. Tada bismo, u potpunosti svjesni posljedica koje takva odluka sa sobom nosi, ali sigurni u njihovu potpunu kontrolu uz pomoć programa kao *VTI-TQI*, pustili segmentu/kolosijeku da nastavi sa svojim daljnjim propadanjem, dok bi se eventualna intervencija dogodila tek u trenutku samog približavanja razini urgentnog održavanja. Imajući to na umu, lako je zaključiti koliko bi dobrobit program kao *VTI-TQI* mogao donijeti željeznici u kombinaciji sa *V/VI Monitor* mjernim sustavom.

3.2. Karakteristične situacije i problemi registrirani *V/VI Monitor* sustavom i *VTI-TQI* programom

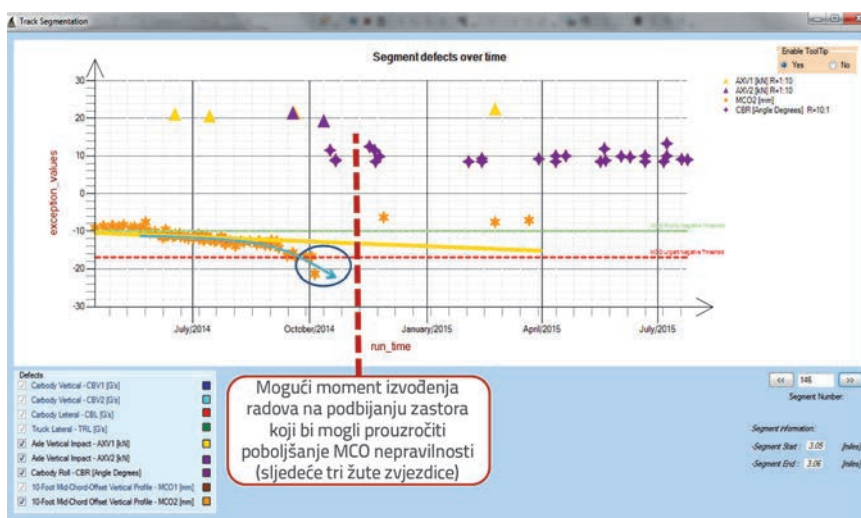
Prva karakteristična situacija se odnosi na međudodnos MCO i AXV nepravilnosti, obrazložen u uvodnom dijelu poglavlja 3. Naime, dijelovi kolosijeka koje karakterizira blago zaprljan zastor mogu prouzročiti pojavu MCO nepravilnosti, ali se u tom slučaju neće nužno generirati AXV nepravilnosti, tj. AXV ubrzanja koja prekoračuju granične vrijednosti. Nasuprot tome, prelazak vozila preko oštre nepravilnosti u uzdužnom profilu kolosijeka/tračnice može proizvesti

velike AXV-sile na kontaktu kotač/tračnica, ali se u ovom slučaju neće registrirati MCO nepravilnost zbog izuzetno malog poremećaja u vertikalnoj geometriji kolosijeka. Ovo je realno očekivati u situacijama kada postoje isključivo AXV nepravilnosti, dakle izričito lokalnog karaktera, koje mogu inicirati izuzetno velike dinamičke sile, ali koje su nedovoljne "dužine" da bi bile zabilježene kao MCO nepravilnosti (tablica 1.). Kad bi se takva AXV nepravilnost dovoljno dugo zadržala u kolosijeku, tada bi, zbog ubrzanog nakupljanja povećanih dinamičkih sila, u nekom kasnijem razdoblju, realno bilo očekivati pogoršanje i širenje problema koji će se u konačnici ostvariti kroz nepravilnosti vertikalne geometrije kolosijeka, tj. MCO nepravilnosti, koje bi nastale kao izravna posljedica. Situacija na slici 11. prikazuje spomenuti mehanizam.

Proces propadanja segmenta prikazanog na slici 11. može se podijeliti u tri perioda. U prvom, obilježenom zelenom linijom, jasno se uočava trend porasta AXV nepravilnosti (ljubičasti trokuti). Nakon izvjesnog vremena dolazi do prekoračenja granice prioritarnog održavanja (gornja horizontalna crtkana zelena linija) od strane AXV nepravilnosti (vertikalna crvena crtkana linija), što ujedno označava i trenutak kada se na danom segmentu prvi put registriraju nepravilnosti vertikalne geometrije kolosijeka, tj. MCO nepravilnosti (narančaste zvijezde u donjem dijelu grafikona, sa žutim trendom - ovdje je potrebno naglasiti da su kod *V/VI Monitora* posebno značajne maksimalne vrijednosti nepravilnosti u apsolutnom smislu, tako da je predznak bez značaja; zato su npr. sve AXV vrijednosti prikazane s pozitivnim predznakom, a MCO vrijednosti s negativnim predznakom). To je ujedno i trenutak u kome nastupa novi period, koji karakterizira zajednički porast AXV i MCO nepravilnosti. Međutim, ovdje se sada pojavljuju i nepravilnosti koje označavaju bočno naginjanje sanduka kola (CBR - tamnoljubičasti romboidi). Analizom segmenata sličnih onom prikazanom na slici 11. jasno se mogao uočiti identičan mehanizam pojave CBR nepravilnosti, te se stoga s pravom može reći da će se u situacijama sinkroniziranog pojavljivanja AXV i MCO nepravilnosti s jedne strane kolosijeka,



Slika 11. Utjecaj udarnih dinamičkih sila na propadanje vertikalne geometrije kolosijeka [1]



Slika 12. Neočekivano veliko povećanje MCO nepravilnosti u vrlo kratkom vremenu [1]

kao posljedica, javiti i CBR nepravilnosti. Ovo je zapravo jedan sasvim logičan slijed događaja, koji se javlja kao posljedica različite visine kontakta (dovoljno velikih razmjera) između kotača i tračnice za lijevu i desnu stranu kolosijeka, tj. lijevu i desnu tračnicu.

Na osnovi situacija razmatranih tijekom analize *V/TI Monitor* nepravilnosti moglo se zaključiti da porast sile na kontaktu kotač/tračnica u periodu do jedne ili dvije godine ne bi trebalo dovesti do ozbiljnijih promjena u vertikalnoj geometriji kolosijeka. Dakle, određeni faktor sigurnosti svakako postoji, ali je ipak nužno svakoj situaciji pristupiti s maksimalnom dozom opreza, bez obzira na zaključke koji bi se mogli izvesti na osnovi određenih statističkih podataka. U prilog tome može poslužiti situacija prikazana na slici 12.

Trend negativnih vrijednosti prikazanih na slici 12. predviđa prekoračenje granice urgentnog održavanja skoro godinu dana kasnije u odnosu na ono koje se realno dogodilo (plavi krug). Ovakav slučaj, gdje prirast vrijednosti MCO nepravilnosti

upozorava na potrebu za primjenom trenda nelinearnog tipa, tijekom analize mogao se susresti i na drugim segmentima. Ako bismo željeli biti još precizniji, rekli bismo da trend nelinearnog tipa postaje od presudne važnosti onog trenutka kada vrijednosti MCO nepravilnosti prekorače *Near Urgent* limit. Do tog trenutka aproksimacija prirasta vrijednosti MCO nepravilnosti u smislu linearnog trenda pokazuje se kao prilično pouzdana. Tijekom analize, gledano u postotcima, ovakav napredak MCO nepravilnosti se vrlo rijetko mogao susresti, ali je svakako poželjno imati na umu da su i takve situacije moguće i realno ostvarive, što bi bilo veoma zanimljivo za neka daljnja istraživanja. Još jedno moguće objašnjenje za sporiji linearni trend koji su izazvala posljednja tri mjerena MCO (zadnje tri žute zvijezdice) jest taj da je u periodu prije njih obavljeno pobijanje kolosijeka na tom segmentu, kao što je također hipotetički prikazano na slici 12.

Pri razmatranju nepravilnosti koje se registriraju kao lateralno (bočno) ubrzanje (*Truck Lateral* - TRL) okretnog osovinskog postolja, treba uzeti u obzir poziciju senzora zaduženog za mjerenje tih nepravilnosti, jer na njega utječu primarna ogibljenja (slika 2.). Zbog toga će TRL senzor ponajprije registrirati probleme vijugavog sinusoidnog kretanja (*hunting*) osovinskog postolja, čiju pobudu obično izazivaju upravo one nepravilnosti

navedene u okviru tablice 1. (istrošeni profili kotača, oštećeni amortizeri i slika). Zbog toga su ove nepravilnosti relativno od najmanjeg interesa za probleme infrastrukture.

Za razliku od AXV i TRL nepravilnosti, CBV, CBL i CBR nepravilnosti se odnose na mjerenja ubrzanja sanduka kola, na koji djeluju i primarno i sekundarno ogibljenje. CBL (*Carbody Lateral*) nepravilnosti, (slika 2. i tablica 1.), prije svega se odnose na horizontalnu geometriju kolosijeka, tj. geometrijske nepravilnosti većih valnih dužina. Senzori namijenjeni registriranju CBL nepravilnosti mjere oscilacije sanduka kola, koji će upravo zbog ogibljenja reagirati sa "zakašnjenjem" u odnosu stvarnu geometrijsku nepravilnost kolosijeka. Ustvari, ta ogibljenja "filtriraju" učinke geometrijskih nepravilnosti visoke frekvencije, tj. male valne dužine, koji potječu od nepravilnosti tračnica, tako da sanduk "osjeća" samo "grube" nepravilnosti (većih valnih dužina). Upravo iz tog razloga, CBL nepravilnosti ne moraju nužno izravno pratiti bočna ubrzanja osovinskog postolja,

tj. TRL nepravilnosti. Naravno, između njih konceptualno postoji određena veza, i realno je očekivati da će pri velikim vrijednostima bočnog ubrzanja osovinskog postolja (TRL) doći i do pojave CBL nepravilnosti, ali će pritom ona reagirati sa "zakašnjenjem", i sigurno neće biti toliko velika i očigledna kao TRL nepravilnost. S tim u vezi razmotrit će se situacija prikazana na slici 13.



Slika 13. Veza između TRL i CBL nepravilnosti [1]

Kao što se može vidjeti sa slici 13., TRL nepravilnosti su u ovom slučaju konstantno iznad granice urgentnog održavanja (zeleni horizontalna linija – granica urgentnog održavanja za TRL nepravilnosti je određena istom vrijednošću kao i granica prioritetnog održavanja za CBL nepravilnosti). Određeni trend TRL nepravilnosti očigledno postoji, i kao što se može vidjeti na slici 13., njegov nagib je gotovo identičan nagibu trenda definiranog vrijednostima CBL nepravilnosti. Brzine kojima su se kretala mjerna vozila prilikom registriranja tih nepravilnosti iznosile su oko 70 km/h (± 5 km/h).

Koncept mjerenja vertikalnog ubrzanja sanduka kola (CBV1 i CBV2) sličan je konceptu mjerenja bočnih ubrzanja sanduka CBL, samo što je orijentiran u vertikalnoj ravni. Ako se u slučaju bočnih ubrzanja sanduka kola, CBL, analizirala povezanost s bočnim ubrzanjima osovinskog postolja, TRL, onda se u slučaju CBV nepravilnosti pažnja mora primarno posvetiti njihovom odnosu s nepravilnostima vertikalne geometrije kolosijeka, MCO i vertikalnim ubrzanjima osovina AXV i s njima vezanim udarnim silama na kontaktu kotač/tračnica. Važno je upozoriti i na činjenicu da se CBV nepravilnosti, nakon prvog pojavljivanja, prilično dugo kreću u opsezima prvobitno zabilježene vrijednosti.

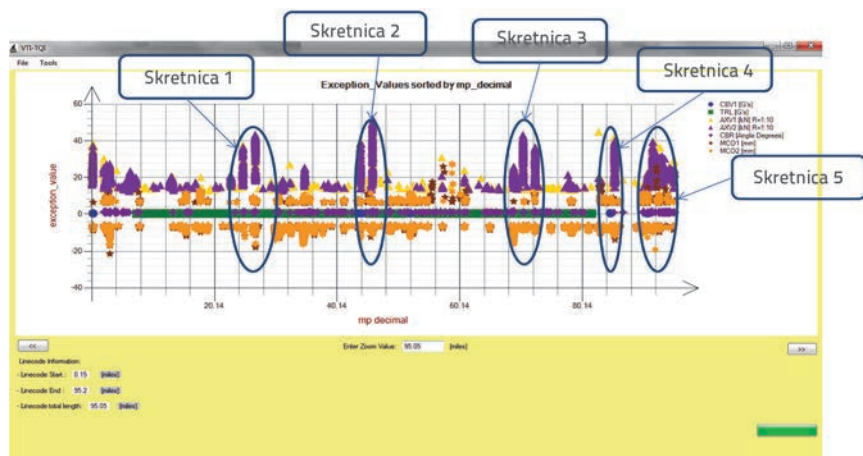
3.3. Problemi skretnica i križališta registrirani V/TI Monitor sustavom i VTI-TQI programom

Značajan broj interesantnih situacija identificiranih tijekom analize odnosio se na skretnice i križališta, koje svojim geometrijskim i strukturnim karakteristikama često predstavljaju glavne izvore pobude gotovo svih tipova V/TI Monitor nepravilnosti. Istovremeno, skretnice i križališta upravo predstavljaju one elemente željezničke infrastrukture koji tradicionalno zauzimaju najveći dio sredstava namijenjenih radovima na održavanju i remontu svake željeznice. Međutim, tijekom analize različitih dionica, moglo se primijetiti da se na ovim lokacijama pretežno pojavljuju AXV nepravilnosti, koje po svojim vrijednostima vrlo često mogu prekoračiti granice urgentnog održavanja. Jedna od razmatranih dionica na kojoj se vrlo jasno može uočiti koliko su zapravo značajne ovakve lokacije prikazana je na slici 14.

Na početku razmatranja navedene dionice potrebno je naglasiti da se prikaz

u okviru slike 14. odnosi na nepravilnosti svrstane prema stacionaži na kojoj su registrirane, što predstavlja jednu od manualnih analiza koje se lako i brzo mogu provesti uz pomoć "Kolosiječnog prikaza" VTI-TQI programa.

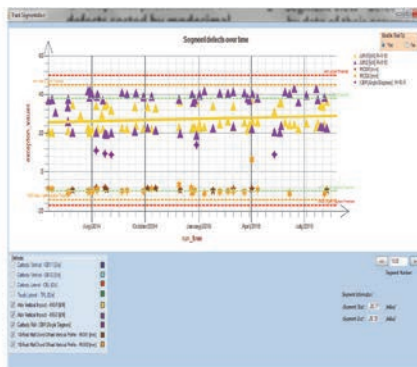
Sa slike 14. vrlo lako se može uočiti da se na cjelokupnoj dionici, koja se prostire na ≈ 100 milja, jasno ističe nekoliko grupa nepravilnosti, tj. nekoliko distinktnih lokacija s velikim grupiranjem nepravilnosti. Daljnjom analizom te dionice, upravo na osnovi ovog prikaza, javila se potreba za provjerom ovih lokacija preko Google Eartha (za sve su nepravilnosti, osim stacionaže, zabilježene i geografske koordinate dobivene GPS uređajem kao dijelom sustava V/TI Monitor), odakle se jasno moglo uočiti da je riječ o lokacijama skretnica, slike 15. do 19. Generalno su ovakvi



Slika 14. Karakteristična situacija s jedne od razmatranih dionica [1]



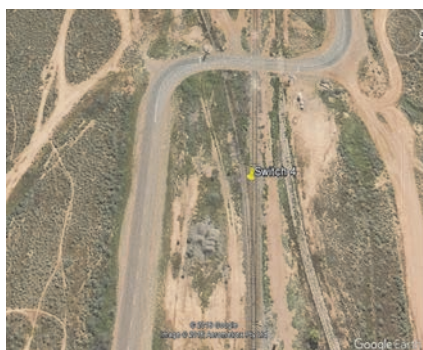
Slika 15. Skretnica 1 - segmentni prikaz [1]



Slika 16. Skretnica 2 - segmentni prikaz [1]



Slika 17. Skretnica 3 - segmentni prikaz [1]



Slika 18. Skretnica 4 - segmentni prikaz [1]



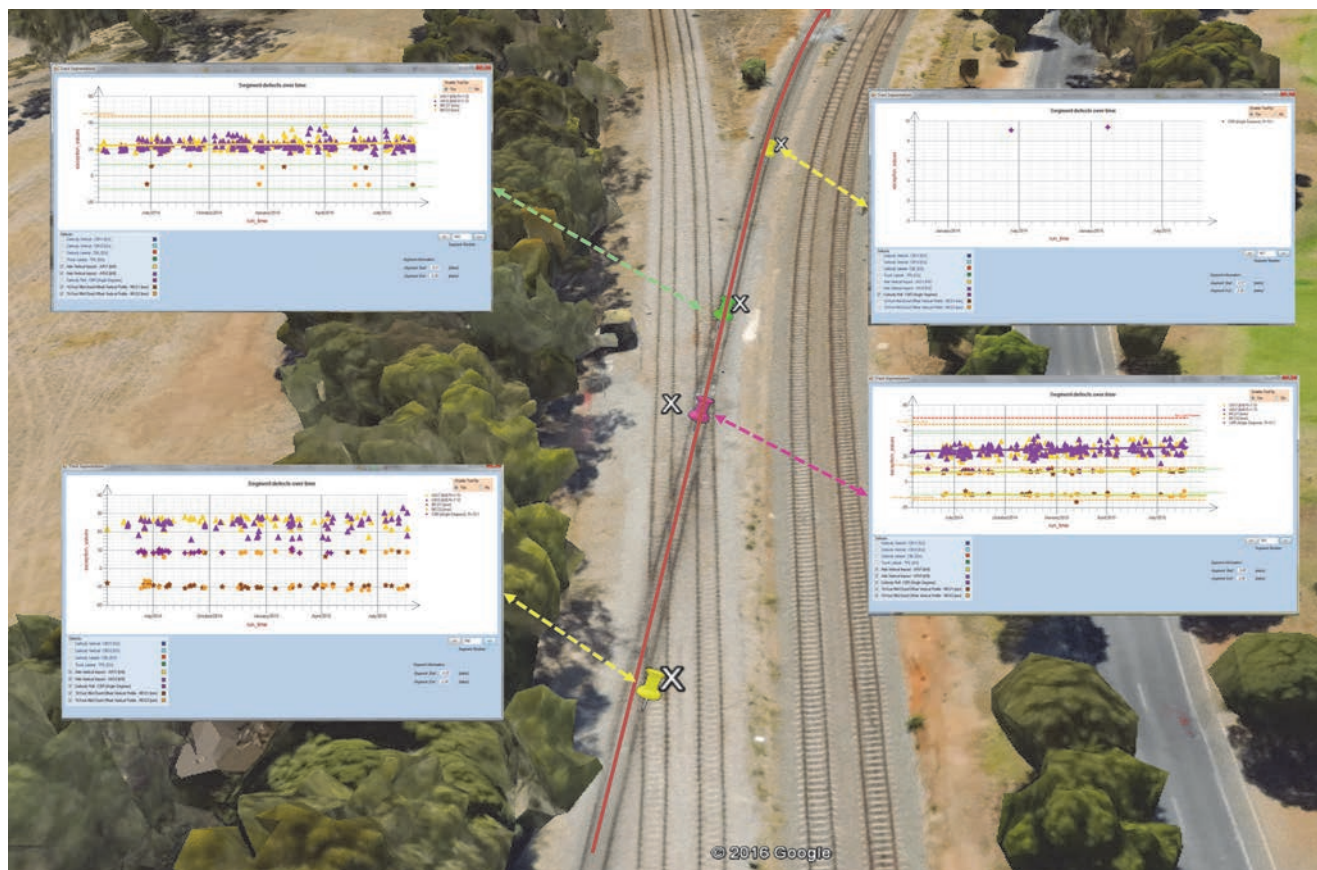
"vrhovi" u okviru prikaza nepravilnosti po stacionaži karakteristični za lokacije na kojima su pozicionirane skretnice i križališta (SiK), željezničko-cestovni prijelazi u razini, prilazi mostovima i dr. Oni, kao što je već navedeno, imaju relativno najveći utjecaj na troškove održavanja i remonta. Upravo zbog toga vrlo važna i korisna mogućnost V/TI Monitor sustava da precizno izmjeri i kvantificira relativno pogoršanje geometrije tračnice i kolosijeka na takvim lokacijama, i posljedično povećanje dinamičkih utjecaja, što se onda može dovesti u izravnu vezu s potrebnim troškovima održavanja i remonta koji se time mogu smanjiti. U nastavku će se prikazati svaka od obilježjenih skretnica i dati kratak opis dotičnih situacija. Na slikama 15. do 19., prikazani su konkretni segmenti dužine 0.02 milje, tj. ~32 m, koji najpreciznije odgovaraju položaju pojedinačnih SiK uređaja.

Kao što možemo vidjeti, skretnicu prikazanu na slici 15. od samog početka promatranog perioda (početak 2014. - kraj 2015. godine) karakterizira pojava AXV i MCO nepravilnosti. Ovo je jedna od lokacija gdje ne možemo govoriti o mehanizmu pojave MCO nepravilnosti uslijed porasta udarnih dinamičkih sila s obzirom na njihovu sinkronizirano pojavljivanje već od prvog mjerenja, ali je očigledno da AXV sile karakterizira strmiji trend (brži rast) u odnosu na MCO nepravilnosti.

Za razliku od segmenta na slici 15, skretnicu prikazanu na slici 16. karakterizira mnogo strmiji trend, kako AXV tako i MCO nepravilnosti. Međutim, ovdje su nepravilnosti u vertikalnoj geometriji kolosijeka (MCO) sasvim sigurno prouzročene udarnim dinamičkim silama (AXV), identično situaciji prikazanoj na slici 11. s početka ovog poglavlja.

Situacije na slikama 17. i 18. mogle bi se poistovjetiti s prethodno prikazanom na slici 16., samo što im je trend, prije svega AXV nepravilnosti, znatno blaži.

Kao što se može primijetiti, skretnice prikazane na slikama 15. do 18. karakteriziraju prilično slični mehanizmi propadanja. Dominantne su udarne sile na kontaktu kotač/tračnica i poremećaji u okviru vertikalne geometrije kolosijeka.



Slika 19. Prikaz nepravilnosti registriranih na dva uzastopna križališta

Situaciju na slici 19. karakteriziraju dva uzastopna križališta. Općenito, u odnosu na prethodno prikazane situacije, u kojima su se uglavnom razmatrale skretnice, može se reći da je situacija i ovdje prilično slična. Očito je da su i ovdje udarne sile u koordinaciji s MCO nepravilnostima nastavile svoju dominaciju. Nakon prelaska vozila preko ovog, za njega očigledno vrlo neugodnog mjesta, situacija se u potpunosti mijenja. To se može vidjeti po broju nepravilnosti registriranih na segmentu prikazanom u gornjem desnom uglu slika 19. (gdje gotovo da nema ni jedne registrirane nepravilnosti), a koji slijedi nakon serije segmenata koji se odnose na križališta. Dakle, u slučaju skretnica i križališta može se govoriti o jednom ustaljenom mehanizmu pojave nepravilnosti. Takva mjesta očito predstavljaju glavni izvor udarnih dinamičkih sila. To je s obzirom na geometrijske karakteristike i karakteristike konstrukcije kolosijeka na ovakvim mjestima u potpunosti očekivano, ali je vrlo bitno imati mogućnost kvantifikacije razmjera i rasta njihovih nepravilnosti tijekom vremena, što osiguravaju *V/TI Monitori VTI-TQI* program. Također, tijekom analize tih nepravilnosti, moglo se primijetiti da se eventualna prekoračenja graničnih vrijednosti održavanja prije spomenutih nepravilnosti događaju baš na ovim mjestima. S tim u vezi, kao što je već napomenuto, iznimno je važno da se u nekom od budućih istraživanja posveti pažnja upravo ovakvim lokacijama, tj. definiranju njihovih specifičnih modela propadanja.

4. Zaključak

Za razliku od tradicionalnih sustava, koji se prije svega odnose na mjerenje geometrije kolosijeka, *V/TI Monitor* sustav karakterizira potpuno drugačiji koncept, koji se zasniva na mjerenju ubrzanja vozila (osovinskog sloga, osovinskog postolja i sanduka kola) u interakciji s kolosijekom. Osim lakog i jeftinog određivanja ključnog skupa od nekoliko postotaka (obično 10-20) najugroženijih lokacija na mreži, koji predstavljaju sam vrh liste prioriteta za održavanje, primarni fokus ovog sustava je registriranje nepravilnosti lokalnog karaktera, koje po svim dosadašnjim istraživanjima predstavljaju glavne uzročnike propadanja kolosijeka. Osim toga, ključni potencijal *V/TI Monitor* sustava je taj da on svojom autonomnošću i karakteristikama koje posjeduje, može obavljati svakodnevna mjerenja bez bilo kakvih restrikcija prometa, što je iznimno važno ne samo za putnike i teret, nego i za željeznicu.

Velika količina podataka koju *V/TI Monitor* sustavi svakodnevno pružaju, nedvosmisleno daje potpuno drugu dimenziju problemu s kojim se inženjeri zaduženi za održavanje željezničke infrastrukture susreću. Ako bi se uz osnovno znanje koje je potrebno kako bi se podaci dobiveni ovim sustavom na adekvatan način interpretirali, prikazali i razumjeli, primijenio i *VTI-TQI* program, došlo bi se u situaciju u kojoj bi

se s potpunim pravom moglo reći da se nalazimo korak ispred procesa propadanja kolosijeka, jer bi se moglo predvidjeti kada će određeni parametar, ili kombinacija više njih, prekoračiti odgovarajuću razinu održavanja.

Za moderne željeznice koje troše golema financijska sredstva na godišnja održavanja i remont, i koje karakterizira velik opseg prometa, i/ili velike brzine i osovinska opterećenja, svako unaprijed predviđeno planiranje radova na održavanju i remontu iznimno je značajno i može uštedjeti značajne troškove. To je

upravo ono što *V/TI Monitor* sustav, uz podršku alata kao što je VTI-TQI, može osigurati. Naravno, iako je teoretski moguće, nije realno očekivati da će sve situacije koje se karakteriziraju kao kritične uspjeti riješiti u isto vrijeme. S tim u vezi, proces odlučivanja o tome kada i gdje izvršiti potrebne korekcije bit će u potpunosti u nadležnosti osoblja zaduženog za upravljanje danom željezničkom infrastrukturom. *V/TI Monitor* sustav i VTI/TQI računalni program samo pružaju značajnu podršku i pomoć u tom smislu.

LITERATURA

- [1] Tešić, P.: Analiza mernih podataka Vehicle Track Interaction (V/TI) sistema (The analyses of Vehicle Track Interaction (V/TI) measurement data), Diplomski rad, Univerzitet u Novom Sadu, Fakultet Tehničkih Nauka, Novi Sad, Srbija, 2016.
- [2] Jovanović, S., Guler, H., Čoko, B.: Track degradation analysis in the scope of railway infrastructure maintenance management systems, *Gradjevinar*, 67 (2015) 3, pp. 247-258.
- [3] Jovanović, S., Božović, D., Tomićić-Torlaković, M.: Railway infrastructure condition-monitoring and analysis as a basis for maintenance management, *Gradjevinar*, 66 (2014) 4, pp. 347-358.
- [4] Guler, H., Jovanovic, S., Evren, G.: Modelling railway track geometry deterioration, *Proceedings of the ICE – Transport*, 164 (2011) 2, pp. 65 – 75, <https://doi.org/10.1680/tran.2011.164.2.65>
- [5] Federal Railroad Administration - Office of Safety Analysis, <http://safetydata.fra.dot.gov/>
- [6] Tzanakakis, K.: *The Railway Track and Its Long Term Behaviour*, Springer, 2013, <https://doi.org/10.1007/978-3-642-36051-0>
- [7] Haladin, I., Lakušić, S., Koščak, J.: Measuring vibration damping level on conventional rail track structures, *GRAĐEVINAR*, 68 (2016) 6, pp. 461-476, doi: <https://doi.org/10.14256/JCE.1532.2015>
- [8] Maldonado, R., Dick, M.: Expanded Use and Evaluation of Autonomus Vehicle/Track Interaction Equipment, IHHA – International Heavy Haul Association Conference 2015, Perth (Australia), 2015.
- [9] Clark, D., Toth, T., Dick, M., Maldonado, R.: V/TI Monitor Cluster Analysis and Implementation, AREMA 2015 annual conference & exposition, Minneapolis (USA), 2015.
- [10] Clark, D., Toth, T.: Vehicle Track Interaction, *Proceedings of the 2006 AREMA Annual Conference*, Louisville (USA), 2006.
- [11] Jovanović S., Matić B., Marinković M., *Railway track superstructure and maintenance (Gornji stroj i održavanje željezničkih pruga)*, Lecture notes, University of Novi Sad, Faculty of Technical Sciences, Department of Civil Engineering and Geodesy, 2017, ISBN 978-86-7892-984-7
- [12] Pace, P., Jovanovic, S.: Using measurement data for decision support, *International Railway Journal*, 51 (2011) 7, pp. 37-39.